

ОБОБЩЕННЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ ДВИГАТЕЛЯМИ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Л.А. Новиков, к.т.н., доц.; Н.А. Вольская, н.с.
ООО «ЦНИДИ-Экосервис»

При оценках уровня и вклада в загрязнение атмосферы городов различными видами транспорта, как правило, используется экспертная оценка, которая базируется на полноте сведений об источниках загрязнения. В крупных портовых городах, в особенности при наличии морского, смешанного (река–море) и внутреннего судоходства, в локальный уровень загрязнения атмосферы существенный вклад вносят силовые судовые установки. Однако сведения о загрязнении воздуха с судов смешанного (река–море) и внутреннего плавания в экспертном сообществе официальных природоохранных организаций весьма неполные. В настоящей работе представлены обобщенные статистические данные по показателям выбросов главных и вспомогательных судовых силовых установок, полученные на основании прямых измерений этих показателей, выполненных на заводах изготовителей и на борту судов различного назначения.

Среднесуточный уровень загрязнения атмосферы современных мегаполисов выбросами вредных веществ от всех видов транспорта, как правило, превышает предельно допустимые концентрации (ПДК), а в местах скопления транспортных средств, в особенности при неблагоприятных погодных условиях, достигает пиковых значений от 8 до 12 ПДК. Даже такие решительные административные «природоохранные» меры, как, например, увеличение ПДК окислов азота в атмосфере населенных пунктов с 0,085 мг/м³ до 0,2 мг/м³ (в 2,5 раза) существенно не улучшило эту малопривлекательную статистику.

При оценках вклада в загрязнение атмосферы городов различных видов транспорта доминирует автомобильный транспорт, на долю которого (по оценкам экспертов) приходится от 60 до 95 %. Необходимо подчеркнуть, что фактически измеренная концентрация вредного вещества в воздухе при проведении мониторинга загрязнения атмосферы является величиной интегральной, и корректность экспертной оценки по дифференциации вклада каждого вида транспорта в общее загрязнение определяется корректностью оценки двух основных величин: данными о

количестве топлива, сожженного определенным видом транспорта; данными об удельных выбросах вредных веществ, образующихся при сжигании тонны топлива каждым видом транспорта.

Если данные по двум названным величинам для автомобильного транспорта достаточно надежны и доступны в силу повышенного внимания к доминирующему источнику загрязнения, то для других видов транспорта, например водного, положение достаточно неопределенное по следующим причинам.

Во-первых, типаж и агрегатная мощность судовых двигателей имеет очень широкий диапазон. Так, например, мощность главных двигателей морских судов составляет 10–15 МВт, судов смешанного (река–море) и внутреннего плавания 0,5–2,0 МВт, вспомогательных судовых дизель-генераторов 100–250 кВт. Данные по значениям удельных выбросов судовых дизелей, которыми пользуются эксперты либо безнадежно устарели, либо вообще отсутствуют.

Во-вторых, учет количества топлива, потребляемого судами при заходе в порт или при следовании транзитом по акватории в черте города (например, при проходе по Неве через центр Санкт-Петербурга), уже само по себе проблема, поскольку суда бункеруются (заправляются топливом) в разнообразных пунктах, достаточно удаленных от места, где осуществляется и контролируется выброс вредных веществ. В подтверждение методической сложности учета выбросов водного транспорта в загрязнение атмосферы города можно привести тот факт, что в официальных опубликованных материалах по загрязнению атмосферы Санкт-Петербурга [1] данные по выбросам водного транспорта вообще не приводятся. В то же время, согласно официальной статистике, в Морской порт Санкт-Петербурга ежегодно заходит не менее 27 тыс. судов и почти столько же судов смешанного (река–море) и внутреннего плавания следует транзитом по Неве из Балтийского моря в порты Онежско-Ладожского водного бассейна и обратно.

Принимая во внимание отсутствие в РФ актуализированной методики расчета выбросов в атмосферу с судов, отражающей все разнообразие типажа судовых двигателей и особенности их эксплуатационных технологических рабочих ци-

клов, в настоящей работе сделана попытка получения надежных исходных данных для разработки такой методики. В ближайшее время, пока такая методика не разработана, полученные исходные данные могут быть использованы в рамках реализации методических указаний по данной проблеме, разработанных Европейским агентством охраны окружающей среды (European Environment Agency). Эти рекомендации, изданные в виде руководства по инвентаризации вредных выбросов различных видов транспортной техники (Emission Inventory Guidebook) учитываются при оценке выбросов в атмосферу от флота в зоне, называемой ЕМЕР областью и ограниченной меридианами от 40° Западной долготы до 60° Восточной долготы и к Северу от 30° Северной широты. В совокупности все изданные European Environment Agency (ЕЕА) нормативные акты по инвентаризации выбросов транспорта условно обозначают аббревиатурой ЕМЕР/CORINAIR.

В настоящей работе представлены обобщенные статистические данные по показателям выбросов главных и вспомогательных судовых силовых установок, полученные на основании прямых измерений этих показателей в процессе заводских приемо-сдаточных испытаний, а также при испытаниях на борту судов различного назначения. Обобщение показателей выбросов судовых дизелей выполнено по статистической выборке, включающей более 120 модификаций судовых дизелей, произведенных в нашей стране и ввезенных на ее территорию за последние двадцать лет. Подавляющее большинство из них эксплуатируется на судах в настоящее время. В рассмотрение приняты только данные официальных испытаний, выполненных аккредитованными испытательными лабораториями и имеющими высокий уровень надежности.

Постановка задачи

Наиболее надежным источником информации как для ориентировочных, так и для точных оценок вредных выбросов судов в ближайшем будущем может стать бортовая судовая документация. После принятия в 1997 г. Международной Морской организацией (ИМО) Приложения VI к Международной Конвенции МАРПОЛ 73/78 каждый судовый двигатель, выпущенный после 01.01.2000 г., должен иметь на борту «Технический паспорт выбросов судового двигателя» (сокращенно «Технический файл»), одним из разделов которого является протокол стендовых сертификационных испытаний, подтверждающий его соответствие действующим международным нормам. Несмотря на то что сертификация судовых двигателей, предназначенных для установки на морские суда в РФ, уже стала обязательной, подобная практика пока не распространена на

двигатели, установленные на судах внутреннего и смешанного плавания, находящиеся в классе Российского речного регистра. Необходимой документацией (сертификатами соответствия и «Техническими файлами») оснащено крайне мало судов (не более 1–2 % от эксплуатируемого парка), и весь флот, с учетом сегодняшних темпов его обновления, будет снабжен необходимой документацией не ранее, чем через 10 лет. В этих условиях для проведения корректных расчетов и экспертных оценок необходимо использование других относительно надежных статистических данных.

Согласно рекомендациям ЕМЕР/CORINAIR, задача надежной количественной оценки выбросов в атмосферу любого рассматриваемого региона от водного транспорта будет определяться следующими факторами:

- данными о количестве вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу при сжигании единицы массы топлива главными и вспомогательными силовыми установками (усредненными для отдельных, наиболее характерных режимов технологического цикла);

- данными о количестве вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу главными и вспомогательными силовыми установками при выполнении полного технологического цикла, характерного для назначения двигателя;

- данными о наиболее характерных технологических циклах силовых установок судна, определяемых навигационными условиями или режимами движения судов на водных путях контролируемого региона или акватории;

- данными о расходе топлива каждым отдельным судном и всеми судами, находящимися в контролируемом регионе или акватории с учетом навигационных условий и режимов движения судов;

- данными о мощности главных и вспомогательных двигателей, установленных на судах, находящихся в контролируемом регионе или акватории;

- данными о количестве и времени нахождения судов в рассматриваемом регионе или акватории.

Для судовых двигателей, имеющих диапазон мощностей от 50 кВт до 20 МВт и работающих на легких и тяжелых сортах жидкого топлива, корректность определения первых двух из названных факторов определяет корректность решения задачи в целом, причем как глобального, так и локального характера.

Следующие три из названных факторов (технологические циклы, расход топлива и мощность, реализуемая в процессе технологического цикла) определяется статистическими методами, если

выбросы оцениваются глобально или на довольно обширной территории, например в ЕМЕР области. Для этого случая детализация не имеет решающего значения и вполне можно обойтись среднестатистическими технологическими циклами, используемыми при проведении стендовых сертификационных испытаний двигателей. При решении задач локального характера, например для конкретного порта или участка движения, режимы движения судов определяют правила и условия судоходства на этих акваториях. Для этих случаев необходима детализация, учитывающая конкретные локальные условия.

Определение времени нахождения источника выбросов или группы источников в пределах контролируемой акватории является навигационной задачей, и корректность ее решения будет определяться теми техническими средствами, к которым имеет доступ контролирующая организация. Для решения глобальных задач наиболее пригодны спутниковые навигационные системы; для решения задач локального характера достаточно наличие строгого контроля прибывающих, находящихся на рейде или у пирса и убывающих судов.

Задача определения выбросов от силовых установок с судов в наиболее общем виде может быть решена двумя методами:

➤ расчет выбросов при наличии данных о мощности силовых установок и известных удельных средневзвешенных выбросах, приходящихся на киловатт (мегаватт) мощности;

➤ расчет выбросов при наличии данных о расходе топлива силовыми установками и известных удельных средневзвешенных выбросах, приходящихся на килограмм (тонну) сожженного топлива.

Согласно рекомендациям ЕМЕР/CORINAIR, формула для оценки массы выбросов i -го загрязняющего вещества от всех судов, находящихся в контролируемой акватории, имеет вид:

$$M_i = \sum_{j=1}^N B_j \cdot T_j \cdot e_{ij}^b, \quad (1)$$

где M_i — масса i -го загрязняющего вещества, выброшенного в атмосферу всеми судами за период нахождения на контролируемой акватории, кг или т; B_j — расход топлива судном j , кг/ч или т/сут; e_{ij}^b — обобщенный удельный средневзвешенный показатель выбросов i -го загрязняющего атмосферу вещества судном j , г/кг топлива или кг/т топлива; j — тип судна (табл. 1); N — количество судов, находящихся на контролируемой акватории; T_j — время нахождения на контролируемой акватории судна j за отчетный период, ч, сут.

При отсутствии сведений о расходе топлива судами различного типа можно с достаточной для

ориентировочных расчетов точностью воспользоваться данными табл. 1, заимствованными из методики ЕМЕР/CORINAIR.

При наличии сведений о мощности силовых установок судов, которые всегда можно получить из бортовой судовой технической документации, для расчета выбросов следует применять следующую формулу:

$$M_i = \sum_{j=1}^N P_j \cdot T_j \cdot e_{ij}^P, \quad (2)$$

где P_j — средняя эксплуатационная мощность энергетической установки судна типа j , кВт; e_{ij} — обобщенный удельный средневзвешенный выброс загрязняющего вещества i судном j , г/кВт·ч.

Остальные обозначения аналогичны используемым в формуле (1).

Если известен тип судна, но отсутствуют сведения о мощности силовых судовых установок, можно воспользоваться данными табл. 2, также заимствованными из методики ЕМЕР/CORINAIR.

Как уже упоминалось ранее, в качестве исходных данных для проведения расчетов оценочного характера необходимы сведения об удельных средневзвешенных показателях вредных выбросах по топливу и удельных по мощности средневзвешенных выбросов загрязняющего вещества.

Удельный средневзвешенный выброс по мощности i -го вредного вещества рассчитывают на

Таблица 1

Ориентировочный расход топлива различными судами (ЕМЕР/CORINAIR)

Тип судна	Расход на стоянке, т/сут	Средний расход при движении, т/сут	Расход на номинальной мощности (т/сут) как функция от полного водоизмещения (GT)
Балкер для твердых грузов	8,5	33,8	$20,186 + 0,00049 \cdot GT$
Балкер для жидких грузов	10,3	41,1	$14,685 + 0,00079 \cdot GT$
Судно для общих грузов	5,3	21,3	$9,8197 + 0,00143 \cdot GT$
Контейнеровозы	16,5	65,9	$8,0552 + 0,00235 \cdot GT$
Грузовой (Ro-Ro)	8,1	32,3	$12,834 + 0,00156 \cdot GT$
Пассажирское	17,6	70,2	$16,904 + 0,00198 \cdot GT$
Высокоскоростной паром	20,1	80,4	$39,483 + 0,00972 \cdot GT$
Грузовой (внутренних) речных линий	5,3	21,3	$9,8197 + 0,00143 \cdot GT$
Парусные суда	0,9	3,4	$0,4268 + 0,00100 \cdot GT$
Буксиры	3,6	14,4	$5,6511 + 0,01048 \cdot GT$
Рыболовные	1,4	5,5	$1,9387 + 0,00448 \cdot GT$
Другие суда	6,6	26,4	$9,7126 + 0,00091 \cdot GT$

Таблица 2

Ориентировочная мощность главных судовых двигателей в зависимости от типа и полного водоизмещения (GRT) различных судов

Тип судна	Ориентировочная мощность главного двигателя, кВт					
	< 500 GRT	500–999 GRT	1000–4999 GRT	5000–9999 GRT	10 000–49 999 GRT	≥ 50000 GRT
Танкеры для нефтепродуктов	600 (м)	950 (м)	2200 (м)	4300 (м/с)	9600 (с)	17 200 (с)
Балкеры для сухих грузов	550 (м)	750 (м)	2700 (м)	5000 (м/с)	8800 (с)	17 000 (с)
Балкеры для общих грузов	550 (м)	950 (м)	1800 (м)	5500 (м/с)	8500 (с)	—
Пассажиро-грузовые суда	450 (м)	900 (м)	2850 (м)	6450 (м/с)	12 600 (с)	—
Контейнеровоз	1000 (м)	1750 (м)	2950 (м)	6000 (м/с)	17 200 (с)	35 000 (с)
Грузовой рефрижератор	900 (м)	900 (м)	3100 (м)	8850 (м/с)	10 000 (с)	—
Грузовой Ro-Ro	1500 (м)	1900 (м)	4300 (м)	7200 (м/с)	11 600 (м/с)	12 550 (с)
Пассажирский	550 (м)	—	3350 (м)	7800 (м/с)	16 800 (м/с)	50 000 (м)
Рыболовные траулеры	650 (м)	800 (м)	2300 (м)	5300 (м)	5400 (с)	—
Буксиры	3000 (м)	4050 (м)	6450 (м)	—	—	—
Суда другого действия	500 (м)	900 (м)	3300 (м)	7650 (м/с)	8500 (м/с)	—

Примечание: m — среднеоборотные; s — малооборотные; (m/s) — среднеоборотные или малооборотные.

основании данных стендовых сертификационных испытаний по формуле

$$e_i^P = 0,446 \cdot \mu_i \frac{\sum_{k=1}^m \cdot C_{ik} \cdot V_{exh k} \cdot W_k}{P_{en} \cdot \sum_{k=1}^m \cdot \bar{P}_{ek} \cdot W_k}, \quad (3)$$

где μ_i — молекулярная масса i -го загрязняющего вещества либо его эквивалента по приведению, кг/кмоль; m — количество режимов испытаний в испытательном цикле; k — порядковый номер режима испытаний в испытательном цикле; i — индекс загрязняющего вещества; C_{ik} — измеренная при испытаниях на k -м заданном режиме концентрация i -го загрязняющего вещества в ОГ, об. %; $V_{exh k}$ — объемный расход ОГ, приведенный к нормальным атмосферным условиям ($T_0 = 273$ К, $p_0 = 101,3$ кПа), $\text{нм}^3/\text{ч}$; \bar{P}_e — отношение эффективной мощности дизеля на данном режиме испытаний к номинальной эффективной мощности; W_k — весовой коэффициент режима; P_{en} — номинальная эффективная мощность дизеля, кВт.

Отметим, что числитель формулы (3) представляет собой среднеэксплуатационную скорость

потока вредного вещества (г/ч), а знаменатель — среднеэксплуатационную мощность судовой силовой установки (кВт).

Удельный средневзвешенный выброс по топливу i -го вредного вещества рассчитывают по аналогичной формуле:

$$e_i^b = 0,446 \cdot \mu_i \frac{\sum_{k=1}^m \cdot C_{ik} \cdot V_{exh k} \cdot W_k}{\sum_{k=1}^m \cdot B_{ek} \cdot W_k}. \quad (4)$$

При этом знаменатель формулы (4) представляет собой среднеэксплуатационный расход топлива судовым двигателем.

Для расчета удельных средневзвешенных по топливу или мощности вредных выбросов силовых судовых установок на режимах движения были использованы стандартные испытательные циклы по ГОСТ 30574. Для большей степени приближения к условиям эксплуатации стандартные испытательные циклы заменяются реальными технологическими циклами, полученными на основе режимометрирования основных технологических операций.

Вредные вещества

В международной методике ЕМЕП/CORINAIR для расчета выбросов в атмосферу с судов рассматриваются следующие десять вредных веществ (табл. 3)

Этот перечень можно прокомментировать следующим образом.

Главные и вспомогательные судовые двигатели внутреннего сгорания с воспламенением от сжатия работают на жидких топливах фракций перегонки нефти «соляр» и «мазут», поэтому наличие метана в отработавших газах этих двигателей маловероятно. Появление метана возможно только при использовании газового топлива, что не характерно для отечественного флота. В связи с этим для судовых двигателей нецелесообразно выделять из суммы углеводородов метан.

Источниками выброса аммиака скорее всего могут служить рефрижераторные установки, в ко-

Таблица 3

Контролируемые вредные выбросы с судов по методике ЕМЕП/CORINAIR

NO _x	Оксиды азота в пересчете на NO ₂
SO ₂	Диоксиды серы в пересчете на SO ₂
VOC	Углеводороды в пересчете на CH _{1,85}
NM VOC	Неметановые углеводороды VOC (без CH ₄)
CH ₄	Метан
CO	Оксид углерода
PM	Твердые частицы
CO ₂	Диоксид углерода
NH ₃	Аммиак
N ₂ O	Закись азота

торых аммиак используется в качестве хладагента. Однако это не имеет отношения к силовым энергетическим установкам.

Образование закиси азота N_2O при горении тяжелых топлив, содержащих органические соединения азота возможно, но в деталях пока не изучено, а поэтому дискуссионно. Многие исследования показывают, что при больших избытках воздуха, свойственных для дизелей, эти соединения сгорают с образованием двуокиси, а не закиси азота. По этой причине нецелесообразно вести учет выбросов N_2O , не располагая возможностью качественно и количественно оценить наличие этого компонента в составе выбросов судовых двигателей.

Концентрация частиц при испытаниях на стенде судовых, тепловозных и промышленных двигателей непосредственно не определяется. Определению и нормированию подлежат показатели дымности отработавших газов, определяемой оптическим или фильтрационным методами по ГОСТ Р 51249–99.

Однако имеются достаточно надежные эмпирические зависимости, в целом отражающие корреляцию между оптическими характеристиками дыма и концентрацией частиц. Этими зависимостями вполне допустимо пользоваться, если речь не идет о сертификации дизелей по показателю эмиссии частиц.

Выбросы окислов серы, как продукта полного сгорания одного из компонентов дизельного топлива, полностью определяются количеством серы в топливе. Предполагая, что сера, содержащаяся в топливе, полностью сгорает, удельные выбросы окислов серы можно рассчитывать по формуле

$$e_{SO_2} = \frac{0,02 \cdot B \cdot C_S}{P_e}, \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч}, \quad (5)$$

где C_S — концентрация серы в топливе, % массы (по данным сертификата на топливо); B — часовой расход топлива, кг/ч; P_e — эффективная мощность двигателя, кВт.

Отметим, что результаты измерения выбросов окислов серы с использованием средств газового анализа не всегда оказываются точнее, чем результаты расчета по формуле (5) вследствие недостаточной точности и селективности используемых для измерений современных газоанализаторов.

Количество углекислого газа, как продукта полного сгорания углерода топлива, может определяться непосредственно в процессе проведения стендовых испытаний или расчетным методом при известном количестве углерода и водорода в топливе. При расчете выбросов CO_2 принимается допущение, что углерод топлива полностью

окисляется. Для расчета может использоваться следующая формула:

$$e_{CO_2} = \frac{44,011}{P_e} \left(\frac{B}{12,011} + 1,008 \cdot r \cdot \frac{H}{C} \right) \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч}, \quad (6)$$

где $r(H/C)$ — отношение массовой концентрации водорода и углерода в топливе.

При этом с достаточной для расчетов точностью может не приниматься во внимание неполнота окисления углерода топлива, поскольку предел основной приведенной погрешности измерения CO_2 составляет для лучших газоанализаторов 2,5 %, что значительно превышает количество продуктов неполного окисления.

Остальные вредные вещества, такие как NO_x , углеводороды (в пересчете на $CH_{1,85}$) CO нормируются действующими национальными стандартами как в России, так и за рубежом. Выбросы этих веществ определяются достаточно надежно и по этим данным накоплена достаточно представительная статистика, приведенная в настоящей работе.

Значения удельных средневзвешенных выбросов

Форма представления массива экспериментальных данных в приведенных ниже уравнениях принята с учетом общих закономерностей образования вредных веществ при горении топлива в цилиндре дизеля, согласно которым вредные выбросы в наиболее общем виде могут быть представлены как функция эффективного КПД двигателя. В форме уравнений, наиболее удобных для практического использования, эффективный КПД может быть заменен удельным эффективным расходом топлива (b_e) на режиме максимальной длительной мощности, тем более что данный важнейший показатель двигателя всегда можно найти в бортовой судовой документации.

Действительно, для дизелей любого назначения достаточно строго выполняются общие закономерности вида: $e_{NO_x}/b_e \rightarrow \text{const}$; $(e_{CO}, e_{CH}, e_{PM})b_e \rightarrow \text{const}$. Природа этих закономерностей сегодня общеизвестна, многократно обоснована в предыдущих работах ЦНИДИ [2] и показывает, что выход NO_x прямо пропорционален экономичности дизеля, а выход продуктов неполного сгорания топлива обратно пропорционален этому показателю. Причем указанные закономерности наиболее строго выполняются для дизелей сходного конструктивного исполнения, что и позволяет их использовать для описания качественных и количественных показателей выбросов главных и семейства вспомогательных судовых двигателей.

При отсутствии на борту судна «Технического файла» для расчета выбросов с судов с достаточной степенью надежности можно использовать расчетные значения удельных средневзвешенных

выбросов вредных веществ, которые представлены в виде аппроксимирующих полиномов первой и второй степени и приведены в табл. 4, 5.

На рис. 1 в качестве примера приведен массив экспериментальных данных по удельным средневзвешенным (по мощности) выбросам NO_x главными судовыми дизелями, аппроксимированный полиномом первой степени. Значительный разброс экспериментальных данных по отношению к аппроксимирующей зависимости вида $e_{NO_x} = f(b_e)$, в особенности в диапазоне расходов топлива от 210 до 230 г/кВт·ч, наглядно демонстрирует технические достижения производителей двигателей за последнее десятилетие в направлении снижения вредных выбросов. Это, безусловно, необходимо учитывать при детальном расчете локального уровня загрязнения атмосферы, однако при оценке глобального загряз-

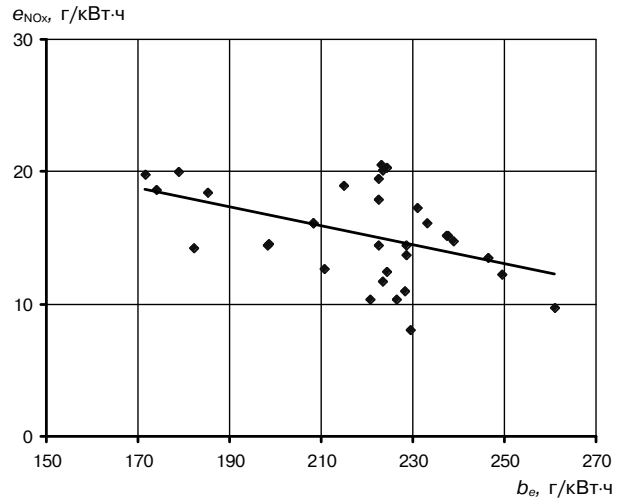


Рис. 1. Удельные средневзвешенные (по мощности) выбросы NO_x главных судовых двигателей (циклы E2, E3)

Таблица 4

Удельные средневзвешенные выбросы вредных веществ главных судовых двигателей (циклы E2, E3)

Обозначение компонента	Диапазон изменения, г/кВт·ч	Аппроксимирующий полином
По мощности		
NO _x	12,0–18,0	$e_{NO_x}^p = -0,0705b + 30,221$
CO	0,20–12,0	$e_{CO}^p = 0,0017b^2 - 0,5929b + 53,431$
VOC (CH)	0,10–1,50	$e_{CH}^p = 0,0139b - 2,3496$
PM	0,10–1,20	$e_C^p = 0,0192b - 3,8928$
По топливу		
NO _x	38,0–120,0	$e_{NO_x}^b = -0,06951b + 220,38$
CO	3,0–40,0	$e_{CO}^b = 0,0057b^2 - 1,9692b + 172,9$
VOC (CH)	1,0–3,4	$e_{CH}^b = 0,0264b - 3,4992$
PM	0,1–4,0	$e_C^b = 0,0481b - 8,6495$

Таблица 5

Удельные средневзвешенные выбросы вспомогательных судовых двигателей (циклы D2, C1)

Обозначение компонента	Диапазон изменения, г/кВт·ч	Аппроксимирующий полином
По мощности		
NO _x	10,0–17,0	$e_{NO_x}^p = -0,0675b + 31,085$
CO	2,0–8,0	$e_{CO}^p = 0,008b^2 - 0,3797b + 46,42$
VOC (CH)	0,2–1,5	$e_{CH}^p = 0,0127b - 2,5091$
PM	0,15–0,85	$e_C^p = 0,0071b - 1,3867$
По топливу		
NO _x	35,0–75,0	$e_{NO_x}^b = -0,2892b + 126,89$
CO	9,0–25,0	$e_{CO}^b = 0,0019b^2 - 0,8566b + 105,38$
VOC (CH)	2,0–5,0	$e_{CH}^b = 0,0333b - 5,2836$
PM	0,6–3,0	$e_C^b = 0,0256b - 4,9263$

нения следует ориентироваться на усредненные значения выбросов, поскольку темпы обновления парка судовых двигателей оцениваются величиной не более 3–5 % в год, и в эксплуатации в основном используются суда с двигателями, построенными 10–15 лет назад.

Среднее квадратичное отклонение (или надежность аппроксимации) при описании массива данных аппроксимирующим полиномом первой степени находится в пределах $R^2 = (0,42–0,78)$, что, при формальном подходе, может показаться недостаточно надежной величиной, однако выбор полинома первой степени более точно отражает характер общих закономерностей, которым следует отдать предпочтение при проведении оценочных расчетов вклада водного транспорта в общий уровень загрязнения атмосферы.

Анализ данных, приведенных в табл. 5 и на рис. 2 убедительно демонстрирует влияние типажа и конструктивных особенностей судовых двигателей на количественные показатели выбросов всех без исключения вредных компонентов и, прежде всего, наиболее опасных NO_x. Так, при сжигании одного килограмма топлива в малооборотном двухтактном судовом дизеле с диаметром цилиндра 500–600 мм в атмосферу выбрасывается 100–120 г NO_x (10–12 % от расхода топлива), в то время как среднеоборотный четырехтактный двигатель с диаметром цилиндра 260–320 мм имеет почти вдвое меньшие выбросы NO_x (50–60 г/кг). Однако столь заметное снижение уровня экологической опасности достигается прежде всего за счет повышения удельного эффективного расхода топлива (со 175 до 210 г/кВт·ч), то есть на 15–17 %, а также за счет снижения почти в два раза агрегатной мощности двигателя. Другими словами, при одинаковой грузоподъем-

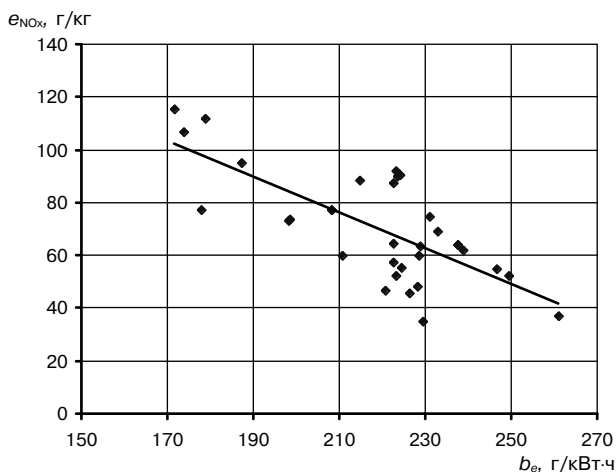


Рис. 2. Удельные средневзвешенные (по топливу) выбросы NO_x главных судовых двигателей (циклы E2, E3)

ности и крейсерской скорости судна главная судовая силовая установка может состоять либо из одного двухтактного малооборотного высокоэкономичного дизеля, либо из двух 4-тактных среднеоборотных двигателей, экологически значительно более безопасных, но зато и существенно менее экономичных.

Современный принцип назначения предельно допустимых технических нормативов выбросов вредных веществ (причем как в национальном, так и в международном законодательстве) подчинен приведенной общей выше физической закономерности: чем лучше экономичность двигателя, тем больший предельно допустимый выброс NO_x разрешен. С точки зрения приоритета экологической безопасности энергетических установок с этим принципом трудно согласиться, однако преодолеть лобби производителей двигателей и судовладельцев и изменить его экологам пока не удается.

Общие закономерности и характер изменения вредных выбросов вспомогательных судовых двигателей (табл. 5) в целом идентичен аналогичным характеристикам главных двигателей, отличаясь от последних только количественно. При этом несколько меньшие значения удельных средневзвешенных выбросов NO_x и большие значения удельных выбросов продуктов неполного сгорания топлива (CO , CH , сажа) определяются не только конструктивными особенностями вспомогательных двигателей, но и различными условиями их испытаний. Так, в испытательном (а следовательно, и в технологическом) цикле судовых дизельных электростанций более значимы режимы средних и малых нагрузок, на которых скорость потока выбросов невелика, а средний коэффициент использования мощности в технологическом цикле вспомогательных судовых установок на 15 % выше, чем главных.

Завершая анализ основных принципов расчета выбросов с судов, а также приведенных в настоящей работе обобщенных данных о количественных значениях вредных выбросов главных и вспомогательных судовых дизелей и общих закономерностях их изменения, необходимо отметить следующее.

Значения удельных средневзвешенных выбросов, рекомендуемых для выполнения расчетов загрязнения атмосферы, достаточно адекватно отражают технический уровень эксплуатируемого парка судовых двигателей, установленных на отечественных и зарубежных морских судах, судах смешанного (река–море) и внутреннего плавания. При этом установлено, что значительная часть судовых двигателей, находящихся в эксплуатации более 10–15 лет, не соответствует действующим техническим нормативам вредных выбросов, хотя задача оценки соответствия эксплуатируемого парка судовых двигателей при выполнении данной работы не ставилась. Последнее замечание в основном относится к судам внутреннего плавания, находящихся в классе Речного регистра, парк которых за последние годы практически не обновлялся, а предписанные природоохранным законодательством периодические контрольные проверки на судах этого класса не проводятся.

Приведенных в настоящей работе данных достаточно для выполнения оценочных расчетов выбросов в атмосферу с судов и оценки вклада водного транспорта в локальный и глобальный уровень загрязнения атмосферы по рекомендациям методики ЕМЕП/CORINAIR. Выполненная с использованием полученных данных расчетная оценка вклада выбросов водного транспорта в атмосферу Санкт-Петербурга показала, что в зоне Центрального района города, прилегающего к Неве, в период навигации он может достигать 5 %, а в промышленных зонах морского и речного портов увеличивается до 7–9 %.

В связи с тем что методика ЕМЕП/CORINAIR не содержит строгих алгоритмов выполнения расчетов выбросов от водного транспорта, а ограничивается только общими рекомендациями, весьма актуальной и своевременной становится задача разработки такой методики для использования специалистами территориальных органов Росприроднадзора.

Литература

1. Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге в 2008 году; под ред. Д.А. Голубева, Н.Д. Сорокина. — СПб. : Сезам-Принт, 2009. — 472 с.
2. Новиков Л.А., Вольская Н.А. Проблемы и перспективы создания малотоксичных дизелей // Двигателестроение. — 1993. — № 1–2. — С. 49–53.